

山岳トンネルの劣化予測と合理的な維持管理に関する一考察

A Study on soundness evaluation and rational maintenance for Mountain Tunnels

山田 浩幸¹・木村定雄²・岡嶋正樹³・重清浩司⁴

Hiroyuki YAMADA, Sadao KIMURA, Masaki OKAJIMA, Koji SHIGEKIYO

The number of tunnels constructed from mid-1950's to mid 1960's which 50 years or more passed after constructions will increase rapidly. These tunnels occupy 30 percent of whole and total spots are 2,919 lines.

Most important function of tunnel is security for inner section, but the performance requirement is thin and we don't determine deterioration factor of tunnel. Because we can't inspect geology condition around tunnel which is covered by tunnel lining. The mountain tunnel has the feature that plain concrete which is the main structure is non-reinforced lining structure and the tunnel itself is unable to be updated easily because of various conditions. The social concern about the maintenance management and reconstruction of a road is also increasing while public investment is controlled. In the future, it'll be important to do well-planned and efficient maintenance or repair by calculation life cycle cost (LCC) and do a preventive maintenance.

In this study, the present condition of the deterioration prediction method of the present mountain tunnel is investigated and analyzed. In addition, we estimate deterioration prediction curve of mountain tunnel from a point of view of asset management, and the future deliberate maintenance and performance-based design are proposed.

Key Words : mountain tunnel, maintenance and repair, soundness evaluation, deterioration prediction, asset management

1. はじめに

今後の地下構造物の維持管理を進めていく中で，山岳トンネルを対象に考えると設計時の基準 50 年以上経過したものが全体の約 30% (2,919 箇所) を占め，今後，急激に増えることは確実である。

トンネルとしての第一の必要機能は空間の確保であるが，これを規定する要求性能は，現状では明確になっておらず，トンネル完成後は，構造材料の 1 つである周辺地山の状態を直接点検できないため，構造物の劣化原因の特定が困難である。また，これまでは，基本的に健全で強固な構造物と考えられ，定期的な点検さえ行われてこなかったために初期点検の情報が少ないことや主たる構造体である覆工コンクリートが，原則的に無筋構造であるといったことから，トンネルの劣化予測を行うのは難しい。しかしながら，近年の覆工コンクリートは落事故や地震による影響を契機にその信頼性が疑問視され，トンネル自体の維持管理・更新への社会的関心が高まっており合理的な維持管理の実現に向けて，劣化予測はこれまで以上に重要となっている。

本研究では，山岳トンネルの合理的な維持管理のために，アセットマネジメント的な観点から劣化予測曲線を評価し，長寿命化に配慮したトンネルの計画・設計・施工・維持管理への提案を行うものである。

本研究では，山岳トンネルの合理的な維持管理のために，アセットマネジメント的な観点から劣化予測曲線を評価し，長寿命化に配慮したトンネルの計画・設計・施工・維持管理への提案を行うものである。

キーワード：山岳トンネル，維持管理，健全度評価，劣化予測，アセットマネジメント

¹正会員 ㈱鴻池組 大阪本店 土木技術部

²正会員 金沢工業大学 環境・建築学部 環境土木工学科

³正会員 パシフィックコンサルタンツ㈱ 交通事業本部 トンネル部

⁴正会員 (株)ドーコン 構造部

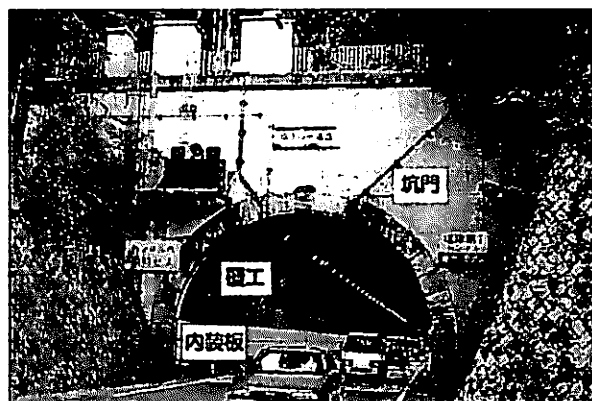


写真-1 既存トンネル本体工の現況¹⁾

2. 山岳トンネルの維持管理の現状

2.1 山岳トンネルの現状と課題

山岳トンネルの用途としては、大きく分類して、鉄道、道路、水路、電力・通信、その他の5つに分類される。ここで、道路トンネルに限定して現状の分析を行うと、道路整備の進展と道路トンネル建設技術の進歩とともに、昭和30年以降に急激な伸びで建設されている。「道路統計年報2006（平成19年）」²⁾によると平成17年4月1日現在に供用されている道路トンネルの総数は図-1に示すように8,784箇所累計延長は3,224 kmとなっている。その内訳としては、設計時の基準50年以上経過したものが全体の約30%（2,919箇所）を占め、今後、急激に増えることは確実である。

これまでの山岳トンネルにおける維持管理の実状をふまえた上で、今後の維持管理を合理的に実施するための課題を挙げると以下のとおりである。

- ① 覆工コンクリートは原則的に無筋構造であるため、鉄筋構造に比べて劣化の予測が難しいこと。
- ② トンネル完成後は、覆工コンクリートの内面の状態しか観察できないため、本来、構造物材料の1つである周辺地山の状態を直接点検できないこと。
- ③ 点検結果の評価（健全度評価）においては、健全度を幾つかにグレーディングし、段階評価を実施しているため、連続的かつ定量的な評価が困難であること。
- ④ 覆工コンクリートの健全度の判定においては、はく離・はく落といった利用者被害に関する判定と、ひび割れに代表される構造的な判定に分類されるが、利用者被害に関する変状の原因は多岐にわたるため、明確な原因分析が困難であり、一方で、構造的な変状に関する発生原因は点検結果だけでは特定できないこと。
- ⑤ トンネルの施工法が時代毎に異なり、覆工材料や設計の思想、施工法に起因する構造的な欠陥といった問題を内在するため、維持管理においては様々な支保や覆工構造のトンネルを対象とする必要があること。

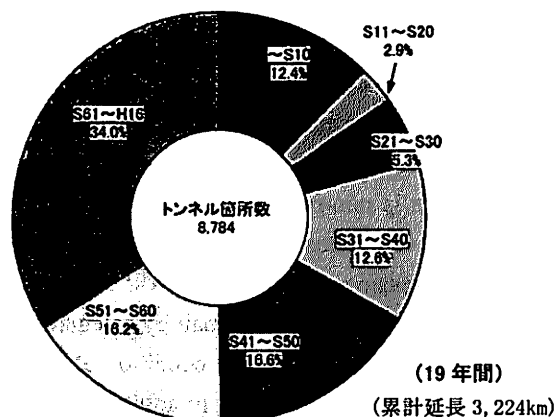


図-1 年代別建設数比率²⁾

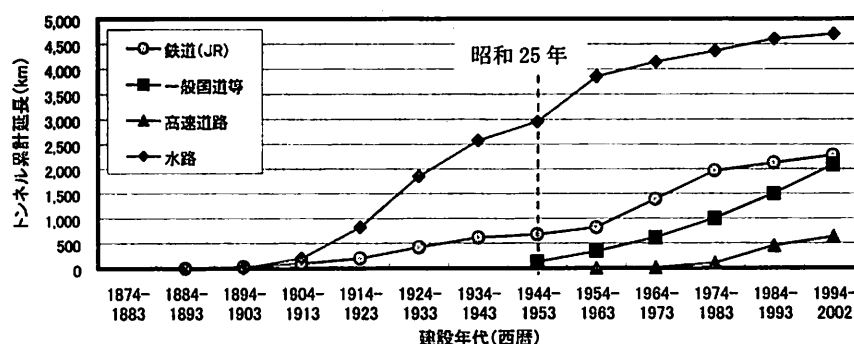
2.2 トンネルにおける維持管理の取り組み

トンネル構造物の合理的な維持管理を実施するにあたっては、多くの課題を解決する必要がある。

また、図-2に示すとおり、道路、鉄道トンネルでは、昭和25年（1950年頃）から施工量が急激に増加しており、今後、維持管理が必要となる山岳トンネルの数は急増する事が予測される。したがって、維持管理を効率的に進めるには、少ない点検結果をもとに、将来の劣化状況をいかに予測し、適切な対策工を実施できるかが重要となる。

これまでの山岳トンネルに対する維持管理は、不具合箇所に対症療法的に対策を実施してきたが、公共投資が抑制される中で、道路の維持管理・更新に関する社会的な関心も高まっている。

このような背景から、今後は、社会資本ストックをいかに長寿命化させるかという要求を具現化する手法として、建設・維持・補修・更新を含



掘削	頂設掘削(日本式)				
	新奥式		底設掘削	底設掘削先進	NATM
支保方式	木製支柱式支保工				
	鋼製支保工				
覆工方式	レンガ・石積み				
	コンクリートブロック				
施工方法	人力				
	場所打ちコンクリート				
材料	引抜き管				
	吹付けコンクリート+RB				

図-2 山岳トンネル建設の歴史と資産推移³⁾

めて、その費用・便益を総合的に評価する方法論である、アセットマネジメントという概念も組み込みながら検討を進めていく必要性が高まっており、各機関において研究が進められている。

3. 山岳トンネルの要求性能と照査

合理的な維持管理を実施するためには、構造物の要求性能を明確にし、それらを的確に照査することができる健全度評価法の確立が不可欠である。

しかし、トンネル構造物における性能とはどのようなものであり、また、それはどのような指標によって評価されるのかは明確になっていない。岡田らの研究⁴⁾では、変状実績や維持管理に係わる事例調査を行い、その結果を踏まえトンネルの要求性能を抽出し、それらを実際の照査項目および照査内容について検討している。

研究では、山岳トンネルを対象に、変状実績や維持管理に係わる事例等を参考にトンネルの必要機能と要求性能について図-3に示すKJ法（川喜田二郎氏による創造的問題解決法）により抽出し、さらに要求性能を実際の照査項目と照査内容について検討されている。

検討では、山岳トンネルの要求性能として

- ①耐久性能（内空変位、耐荷性、周辺地山安定、排水性、耐久性）
- ②安全性能（剥落無し、避難路、耐火性、消火可能）
- ③利便性・快適性（走行性、閉塞感、照度、換気）
- ④周辺環境への影響性能（景観性、振動・騒音、地下水影響）
- ⑤維持管理性能（点検が容易、補修・補強が容易）
- ⑥経済性（建設費、維持管理費、湧水処理費、LCC）

の6項目が抽出された。

これらの山岳トンネルの要求性能と照査項目のまとめを表-1に示す。表では、要求性能と照査項目の関連性についてマトリックス表に整理している。

照査項目としては防災設備や避難路の規模、線形・視距、照度のよう、道路トンネルにおいて特に重要とされるものがいくつかあるものの、概ね鉄道と道路で共通する項目が多いことが分かる。

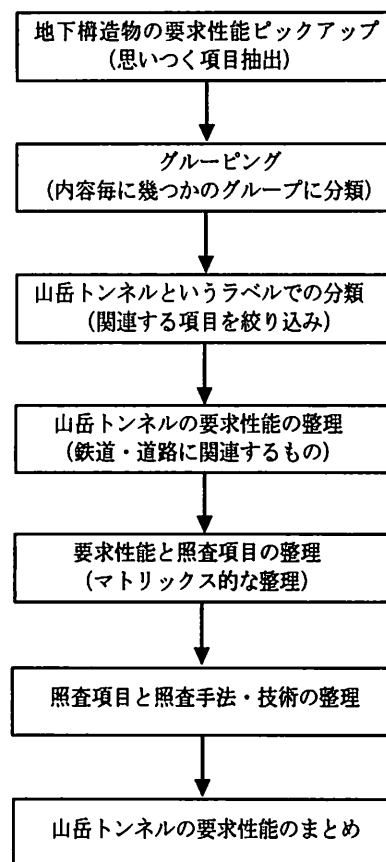


図-3 山岳トンネル要求性能⁴⁾ 検討フロー（KJ法）

表-1 山岳トンネルにおける要求性能と照査項目⁴⁾を一部修正

要求性能	必要な指標	内空形状寸法	内空変位沈下量	地形地質	掘削環境	掘削残余耐力	掘削のひび割れ	掘削強度	防災設備規模	避難路の規模	照度	騒音振動レベル	湧水量水圧・水質	掘削・内装の耐火性	線形視距	坑門工のデザイン
耐久性能	内空変位が無い	○	◎	○	○	○	◎									
	荷重に対し掘削安定		◎	◎	◎	◎	◎	◎					◎			
	周辺地山が安定		◎	◎	◎	○	○									
	排水性が良い												○			
安全性能	耐久性がある	○		○	○	◎	○	◎					○			
	掘削が剥落しない		○	○	○	◎	◎	◎					◎			
	非常時避難路の確保								○ (道路)	○ (道路)						
	耐火性がある					○	○						◎			
利便・快適性能	消火活動が可能								◎ (道路)	◎ (道路)						
	走行性が良い	○	○								○ (道路)	○ (道路)			◎	
	閉塞感が無い	○ (道路)	○ (道路)								○ (道路)					
	必要な照度がある	○ (道路)									◎					
周辺環境への影響性能	換気が良好															
	周囲の景観と調和				○ (道路)										◎ (道路)	◎ (道路)
	騒音・振動が無い				◎ (道路)							◎			○ (道路)	◎ (道路)
	地下水への影響無い												◎			
維持管理性能	点検が容易								○	○						
	補修・補強しやすい	◎		○	○	◎	○	○					◎			
経済性	建設費が安価	◎		○					○	○ (道路)				○		
	LCCが安価	○							○	○			○			

(道路)や(鉄道)とあるのは、道路もしくは鉄道に関連した項目群

4. トンネル劣化予測の現状

4.1 劣化予測手法と長寿命化技術

山岳トンネルの長寿命化を実現するシナリオとしては、(財)道路保全技術センターで検討されており、表-2 に示す 5 つの分類が考えられる。また、図-4 に各分類の劣化予測曲線の概略図を示した。

これまでの道路トンネルのシナリオとしては、イニシャルコストに着目した経済設計によりトンネルを建設し、供用後に生じる不具合に対して対症療法的に補修・補強対策が繰り返されてきた。

しかしながら、数多くのトンネル構造物が老朽化し、一時期に集中して補修・補強対策が必要とされている現状の社会背景を踏まえ、アセットマネジメント的な手法を導入して、今後は 50 年を超えるようなトンネルの長寿命化を図る目的のため、適切な劣化予測を行い、建設時から維持管理に配慮した設計を行っていくことが重要になってくる。

現況の研究レベルではトンネルの劣化予測手法として以下の手法がある。

- (1) 周辺地山の地圧増大の時間依存性を考慮した変状解析手法⁵⁾
- (2) 確率論(マルコフ過程)を用いた劣化予測⁶⁾
- (3) 点検履歴から確率過程を用いた劣化予測手法⁸⁾⁻¹⁰⁾

表-3にそれぞれの予測手法の概要と特徴および課題をまとめた。また、以下の4.2~4.4節に各劣化予測手法の適用について示す。

表-2 トンネル長寿命化のシナリオと対策工⁷⁾

技術分類	長寿命化のシナリオ	具体的な対策工
分類Ⅰ	従来型の補修・補強技術で、施工不良に起因する不具合や覆工のひび割れ等に対して行われる 対症療法的な対策 を実施する	・裏込め注入工 ・ひび割れ注入工 ・面導水、先導水等
分類Ⅱ	将来的な劣化に対する補修を不要とするために、トンネル 建設時から性能を上げておく ことで長寿命化が期待できる。	・繊維補強覆工 ・コンクリート ・インパット設置工等
分類Ⅲ	分類Ⅰに属する一般的な補修対策と比べて、 外力による変状や材質劣化の進行を遅らせる ことで長寿命化が期待できる。	・地山注入工 ・コンクリート ・改質材塗布工等
分類Ⅳ	分類Ⅰに属する一般的な補修対策と比べて、 トンネルの健全度を高めに回復・補強 することにより、長寿命化が期待できる。	・プレキャスト覆工 ・薄肉鋼板内巻き工等
分類Ⅴ	社会的なニーズの変化から 建築限界を拡大 したり、 地盤に対する耐力を増加 させる等ももとの要求性能が向上させることで長寿命化が期待できる。	・トンネル断面 ・拡張工(改築) ・耐荷工等

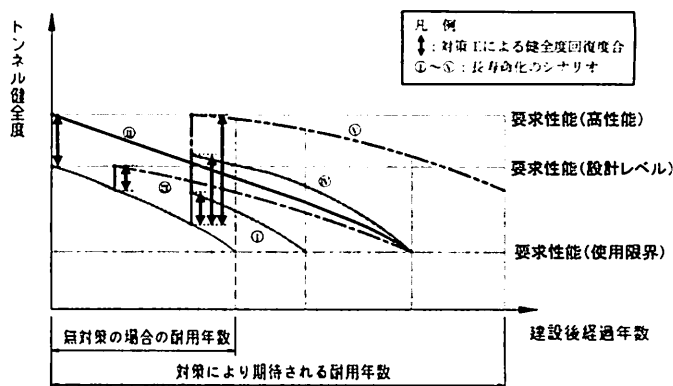


図-4 トンネル長寿命化のシナリオ劣化予測曲線⁷⁾

表-3 各劣化予測手法のまとめ¹³⁾

予測手法	前提条件	予測によるメリット	課題
①時間依存性を考慮した変状解析	①トンネル毎に地山条件、施工方法、変状状況が異なるため個別トンネルでの予測となる。 ②対象トンネルが限定される。 ・変状の著しいトンネル ・長期計測データが存在する ・時間依存の変状が地山特性に依存する場合に限られる。	①計測データに基づく再現解析の実施により適切な地山劣化モデルを構築し、予測解析が可能となる。 ・破壊形態なども再現可能であり、具体的な対策工の検討(設計)が可能。 ②ケーススタディにより対策工の効果が把握できる。	①地山劣化モデルの設定が重要。 ・トンネルの構造: 背向空洞の有無、変状状況(ひび割れ、圧ざ等)、施工法の相違 ・作用土圧: 塑性圧、緩み土圧、偏圧 ②計測データ: 長期間にわたる計測値、データの数により予測精度に影響。 (一般的には、長期計測データは少ない) ③施工時の情報が重要。 (一般的には、詳細な情報が無い場合が多い)
②マルコフ過程に基づく劣化予測	①トンネル条件に左右されない。(対象トンネルを限定しない) ②点検データが最低2時点以上必要。 (竣工時に状態が把握されていれば、これを1時点とすることが出来る) ③重み付けは専門知識のある技術者により設定する。	①移行確率、パラメータを同定できれば、作業は容易。 ②予測方法が簡便で点検データが少なくても将来予測は可能。 ④一般的なトンネル(山岳、シールド、開削)に適用できる。	①移行確率をいかに同定するかがキーポイント。 (設定は容易であるが、移行確率により結果に影響) ②トンネルの変状と移行確率の設定方法をどうするか。 ③重み付けをどう設定するかで結果が異なる。 ④パラメータが多いため、多くのトンネルでの検証が必要。 ⑤点検データの精度に影響される。 ⑥初期値をどう設定するかが課題。 ⑦点検データと健全度の関係を明確にする必要がある。 ⑧補修・補強の効果を評価に取り入れる場合、補修・補強の結果と点検データ、健全度データとの関係を明らかにする必要がある。 また、補修・補強後の移行確率を設定する必要がある。
③点検履歴から確率過程を用いた劣化予測	①トンネル条件に左右されない。(対象トンネルを限定しない) ②点検データが最低2時点以上あること。 ③トンネルの変状挙動と想定した確率過程が対応すること。(コンクリートの劣化の場合と地山のクリープでは異なる)	①スパン全体で評価すれば、維持管理予算の確保、対策の順序を決定する上で有効。 ②点検データが少なくても予測は可能。	①点検データの精度(データの数、ランク、間隔)に左右される。 ②点検データが少ない場合には精度に影響。 ③スパン全体の評価と変状箇所個別評価の取り扱い。 ④劣化予測過程が点検頻度で異なる。 ⑤臨界健全度を大幅に下回る場合の構造安定性の評価。 ⑥LCC検討にあたり、対策費用の設定をどうするか。 ⑦対策工が途中で実施される場合の評価をどうするか。 ⑧解析過程で得られるばらつきをどう評価するか。

4.2 劣化予測解析による予測手法

近年報告された、劣化予測解析による予測手法としては、松長らによる研究⁵⁾がある。
一般に、トンネルの維持管理における措置・対策は、次の二つに大別される。
一つは覆工の材料劣化や漏水等によって生じた変状に対する補修であり、もう一つはトンネル周辺地山からの地圧の増大によって覆工に発生したひび割れ、盤膨れ、断面縮小等の変状に対して、耐力の向上や周辺地山の安定化を図る補強である。この研究で取上げる劣化予測解析による予測手法は、後者を対象としており、周辺地山の塑性化によるトンネルへの作用荷重の増加によって発生する変状の予測とその補強について言及している。

地山劣化モデルでは、図-5に示すMohr-Coulombの降伏条件を用い、地山の各要素の強度定数を低減させることによって地山の降伏あるいは強度低下を発生させる。これにより、周辺地山には応力の再配分が生じ、周辺地山がトンネル内空側へ変形することでトンネルの経時的な変形挙動を表現する。解析手法として、このような手法を取り扱える有限差分法を用いてトンネルの変状進展解析を行っている。

地山劣化モデルには、Mohr-Coulombの降伏条件におけるピーク強度と残留強度の定数が必要になるが、古いトンネルでは建設時の情報はほとんど残されておらず、地山物性値の入手が限定される。また、現状における情報についても、供用中のトンネル坑内からのデータの取得が制限される場合も多いため、表-4に示す多くの室内試験データから得られた軟岩の一軸圧縮強度と各種の物性値との相関関係を利用して地山モデルの物性値を推定している。表-5に変状解析の特徴を示すが、研究では、長期にわたって計測データが得られている実際のトンネルにおいて、梁ばねモデルと地山劣化

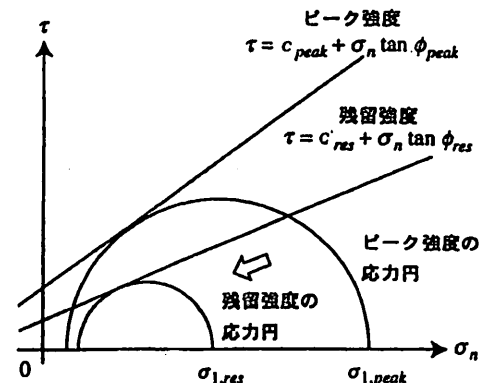


図-5 Mohrの応力円による地山劣化モデルの説明

表-4 地山劣化モデルに用いる地山物性値の設定³⁾

		既往データ	アイダ	蔣	設定値
単位体積重量	kN/m ³	19.0	20.0	—	19.0
一軸圧縮強度	N/mm ²	4.5	—	—	4.5
変形係数	N/mm ²	500	657	450	500
ポアソン比	—	—	0.35	0.2~0.4	0.35
せん断強度	N/mm ²	—	1.32	1.10	1.30
内部摩擦角	°	—	29.1	38.1	30.0
ダイレタンシー角	°	—	20.9	23.3	15.0
残留一軸圧縮強度	N/mm ²	—	1.17	2.17	1.50
残留せん断強度	N/mm ²	—	0.309	0.527	0.433
ピーク内部摩擦角による残留せん断強度	N/mm ²	—	0.344	0.527	0.433
残留内部摩擦角	°	—	34.3	38.1	30.0
残留ダイレタンシー角	°	—	9.55	11.3	10.0

モデルを適用し、変状状況や対策効果の再現性について検討を行っている。

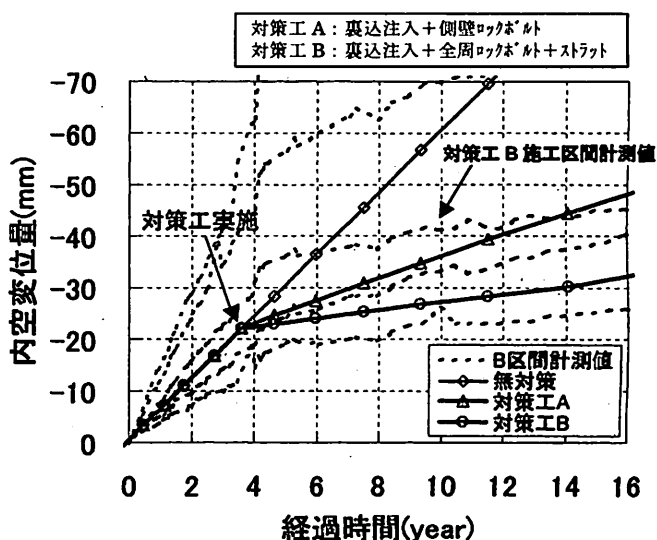
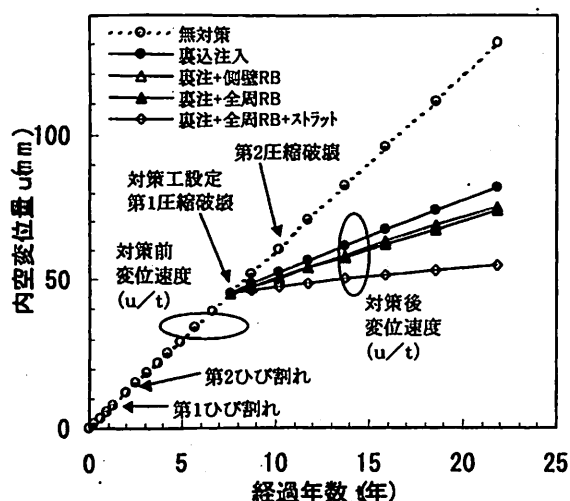
検討では最小限の地質情報と計測結果を利用した劣化予測解析による予測手法を用いて以下の検討が可能である。

- ①実際に近い変状状況およびその進展を表現することができる。
- ②実際に採用された対策工の変位抑制効果を評価することができる
- ③継続的な計測値と地山劣化モデルを組み合わせ、変状の進行性の将来予測や対策効果の定量評価、最適な対策時期の設定等が可能となる。

図-6に地山劣化モデルと梁-ばねモデルを用いた対策工の比較検討例を示し、図-7に地山劣化モデルによる変位抑制効果の再現（対策工B区間計測値と対策工A・Bの相関）を示した。図から判断すると、対策工Bの解析結果のほうが対策工Aの解析結果よりも計測値の挙動を良く表していると判断できる。

表-5 変状解析手法の特徴³⁾

	梁ばねモデル (骨組構造解析)	地山劣化モデル (有限差分法など)
地山	地盤反力をばね（圧縮、せん断）でモデル化	Mohr-Coulomb 降伏規準で地山劣化をモデル化
覆工	梁部材でモデル化（ばね切りで背面空洞を評価）	非線形材料でモデル化（インターフェイス要素で空洞を評価）
ひび割れ	コンクリートの引張強度で評価、塑性ヒンジでモデル化	引張強度で評価、開口をインターフェイス要素でモデル化
圧さ	コンクリートの圧縮限界で評価、解析を終了※	圧縮強度で評価、材料非線形を考慮
解析結果	変状箇所、作用地圧と変位	変状箇所、変位と経時時間、地山の応力状態



4.3 マルコフ過程を用いた劣化予測の試行

モデルトンネルは、NATM で施工され実際に変状を生じ、その調査結果が判明している A トンネル（21 スパン）をもとに設定した。施工は平成 8 年に竣工し、点検調査は、平成 12 年と平成 16 年の 2 回実施している。

図-8 に調査結果の一部（20～30 スパン）のひび割れ展開図を示す。

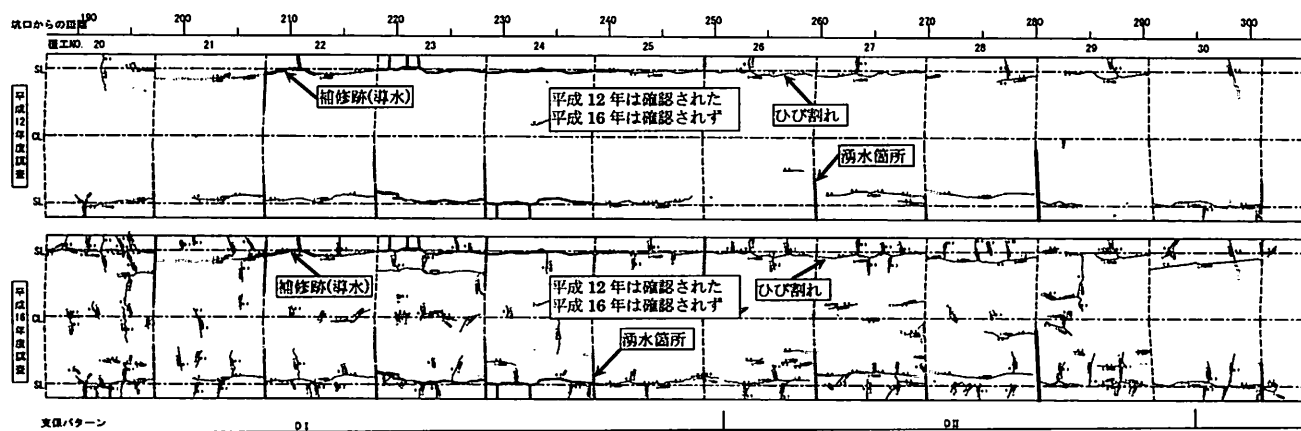


表-6 にトンネル専門技術者による全 21 スパンの平均と最大変状スパンの劣化度を示す。なお、判定区分Ⅰは、浮き・はく離に代表される「利用者被害を誘発する変状」、判定区分Ⅱは外力による変状等による「構造的な変状」である。劣化度の目安は、表-7 に示すとおりで最大 50 とした。

図-9 に評価結果の 1 例を示し、健全度評価の概要を以下にまとめた。

- ①スパン全体での評価では、判定区分Ⅱより、判定区分Ⅰの劣化度の方が大きくなっており、管理側として発生があつてはならない判定区分Ⅰ（利用者被害）に関する評価が優先する結果となった。
- ②H12年度の評価においてアーチ部に閉合ひび割れのあるスパンでは、判定区分Ⅰの劣化度は高く評価されているが、それらを除いては、判定区分ⅠおよびⅡの評価はほとんど同程度であった。判定区分Ⅱ

② H12 年度の評価においてアーチ部に閉合ひび割れのあるスパンでは、判定区分Ⅰの劣化度は高く評価されているが、それらを除いては、判定区分ⅠおよびⅡの評価はほとんど同程度であった。判定区分Ⅱ

表-6 A トンネルの劣化度⁷⁾

		全スパン 平均	最大変状 スパン
判定区分Ⅰ	初回点検 (H12)	10.8	10.6
	2 回目点検 (H16)	19.9	25.0
判定区分Ⅱ	初回点検 (H12)	9.0	8.8
	2 回目点検 (H16)	11.8	15.6

表-7 劣化度の目安⁷⁾

点検要因による判定			劣化段階	劣化段階の状況	対応方針	劣化度	健全度
A	B	S	V	劣化が著しく進行しており、もしも、2年以内に計画がなされないと、必要な補修が現状でできなくなるか、利用者に危険が及ぶ恐れがある。	補修	50	0
			IV	劣化や事故が直ちに起こせば、劣化、事故が5年に進行すると予想され、もしも5年以内に計画行われないと、必要な補修の確保ができなくなるか、利用者に危険が及ぶ恐れがある。	補修	40	10
			III	劣化や事故が一層目られ、このまま進行すると予想される。もし直ちに計画に計画がなされないと、必要な補修が確保できなくなるか、利用者に危険が及ぶ可能性がある。	予防保全	30	20
			II	軽微な劣化や事故が見られる。現状では利用者に危険はなれ、直ちに目も及ばないが、継続的な監視を必要とする。	監視監視	20	30
			I	健全な状態にもほぼ近い。	対策なし	10	40

のバラツキは、側壁部の水平ひび割れを外圧によるものとして評価するかどうかで異なると考えられる。

③健全度評価のバラツキに関しては、ひび割れ性状（発生位置、幅、長さ）や閉合ひび割れのはく落評価において評価者の判断によるバラツキが大きくなっていることが分かる。

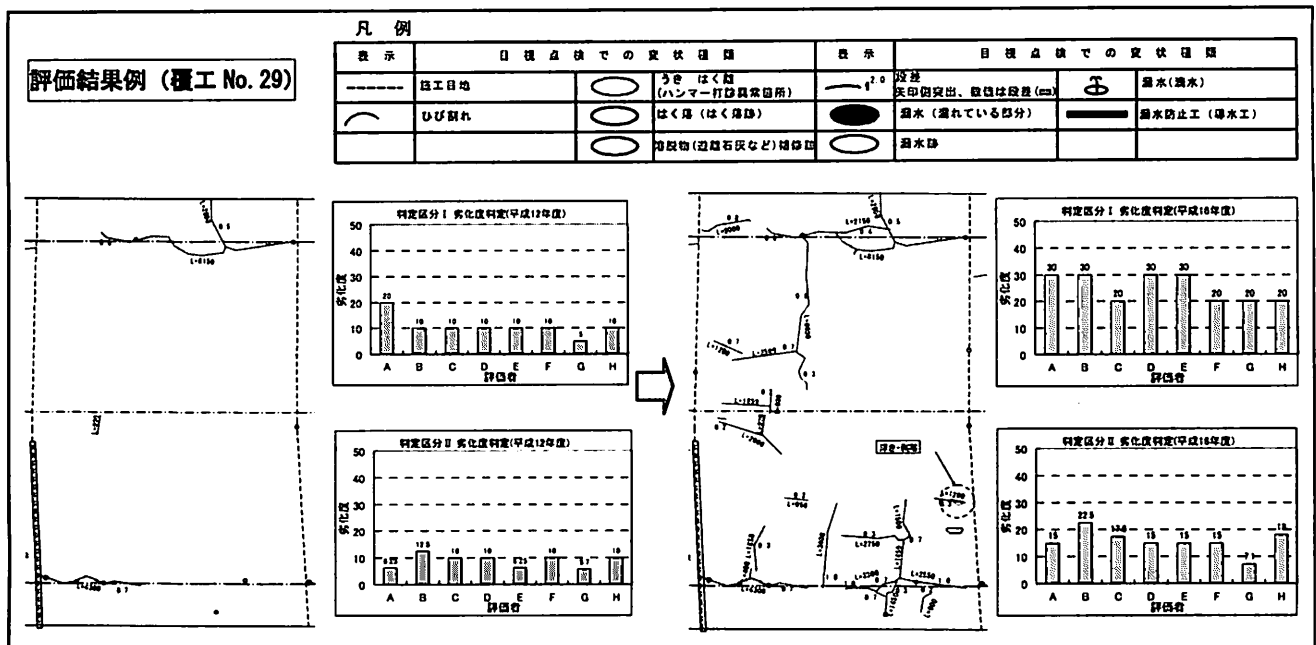


図-9 A トンネル健全度評価結果 (No29 スパン) ¹¹⁾

次に、本トンネルの劣化に関して確率論（マルコフ過程）を用いた劣化予測により試算した。

築4年(H12)での劣化度10.8と築8年(H16)での劣化度19.9から、パラメータを推定すれば、その組み合わせの一つとして、 $N_i=2$ 、 $P_i=0.62$ が得られる。ここで、 P_i は変状が次の判定区分に進行する移行確率であり、 N_i はそれを判定する経年である。同様に、判定区分Ⅱに対してパラメータを推定すれば、 $N_i=2$ 、 $P_i=0.81$ 、 $P_{2\sim4}=0.91$ が得られ、これらから劣化度曲線を示せば図-10のとおりとなる。対象スパン全体の劣化曲線では、判定区分Ⅰは完成当時劣化度がないものの、早い段階で劣化が進行し、築およそ18年で劣化度が25、すなわち健全度が1/2程度になることがわかる。また、判定区分Ⅱは、完成当時から初期値として劣化があるモデルとなっているが、判定区分Ⅰと比較し、劣化進行は緩やかで、築40年程度で健全度が1/2となる。

同様に推定した最大変状スパンでの劣化度曲線では、判定区分Ⅰ、Ⅱとも劣化が速く、構造的な変状に対して早期の対応が必要と判断される。

さらに、この方法を使えば、劣化予測に基づく補修・補強対策の割合の推定も可能となる。

今回の試算は比較的単純な手法で点検結果を用いて劣化予測を行ったものであるが、移行確率や部材・変状の種類や位置によって重み付け係数（パラメータ）を設定する等工夫すれば、トンネル毎の劣化曲線の推定を行うことができる。

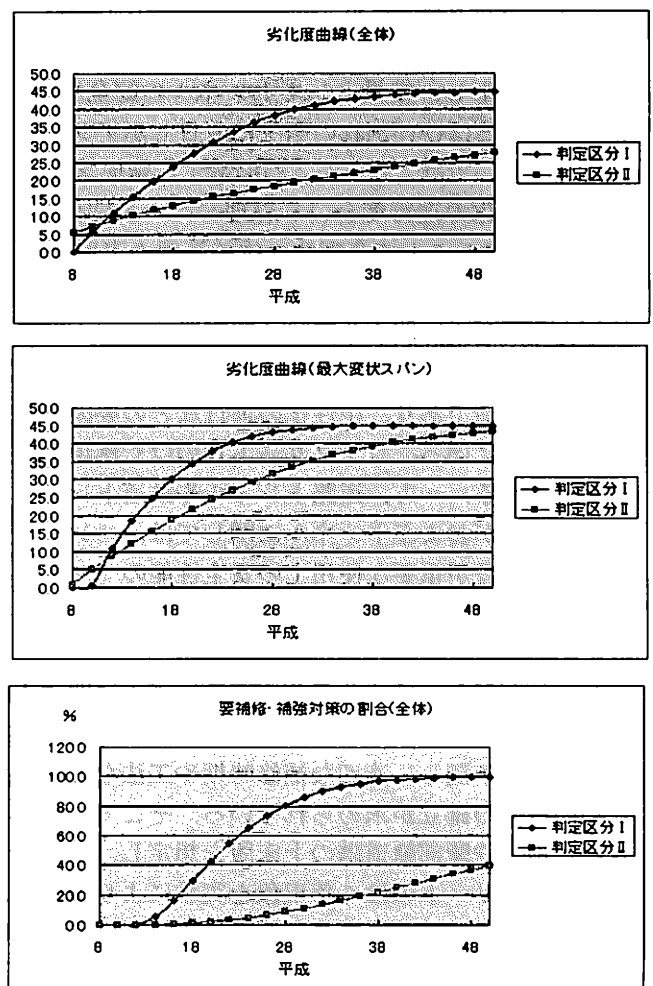


図-10 A トンネル劣化度曲線と補修・補強割合 ⁷⁾

4.4 健全度低下モデルによる検討

一般的に、点検は2年から5年程度の間隔で行われることが多い。すなわち、点検データそのものは点検間隔に応じた離散データになる。しかし、LCCを検討する上で、健全度低下モデルは、時間に関する連続モデルとして扱うことが望ましい。

これを図に示すと図-11のA～Fの経路となる。しかしながら、健全度の低下は点検時毎に判明するため、どの時点で変状による健全度低下が発生したかを点検結果のみから判定することは困難である。ここで、ひび割れ等の変状や補修・補強といった対策工による健全度回復という健全度の不連続性を

を平均的にとらえれば、健全度低下を図中の波線（全体的な傾向を示す曲線）のようにモデル化できる。

以上の点を考慮して、安田ら^{9)~10)}は健全度低下を全体的な傾向でとらえ、幾何学的ブラウン運動モデルを導入した確率過程によって健全度低下をモデル化している。

なお、対策工による健全度回復に関しては、その時点が明確であるため、モデルに組み込み、一方、点検そのものが数点しか存在しないという現実をふまえて、各スパンでの不確実性としてとらえ、全スパンでの全体的な傾向で健全度低下モデルを構築している。

トンネルの劣化予測を検討する上で、ひび割れなどの変状が発生することによって、トンネルの性能や機能水準は低下し、結果としてトンネルの健全度が低下する。この時期を点検のみによって確認することは困難で、安田らはひび割れの発生に着目しポアソン過程を用いてモデルの拡張を行っている^{9) 10)}。

研究においては、安田ら⁹⁾の提案する幾何学的ブラウン運動による健全度低下モデルにより、点検間隔の違いによる劣化の進行度合いや管理レベルの関係を検討するとともに、点検間隔と対策費用といった観点からLCCを試算することで合理的な維持管理の実現を目指している。

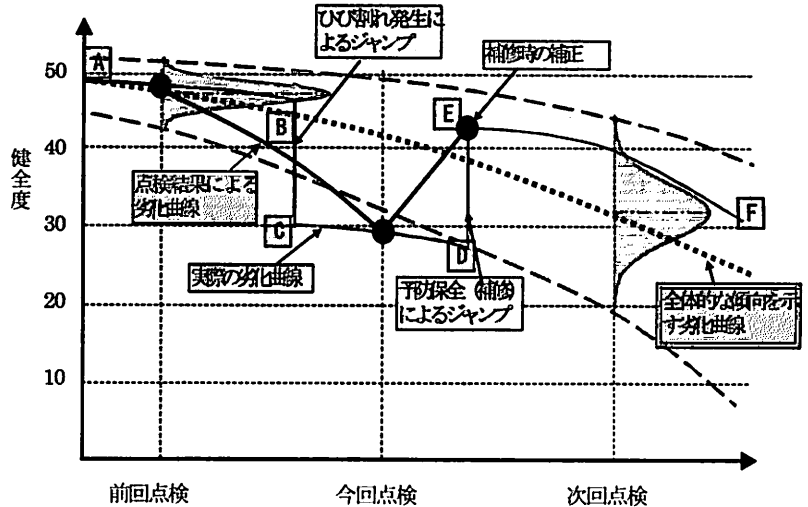


図-11 トンネル施設の劣化過程に関するモデル図⁹⁾

5. 劣化モデルに関する実験的研究¹²⁾

開削トンネルやシールドトンネルの覆工は、一般に鉄筋コンクリート構造であり、中性化の進行などの要因で鉄筋腐食が進行し、それに伴ってコンクリート片のはく落現象が生じることが懸念される。一方、道路トンネルや鉄道トンネルなど、第3者への被害がおよぶトンネルに関しては、コンクリート片などのはく落現象が重要な使用上の安全性能の一つと考えられる。また、はく落現象後の曲げ耐力やせん断耐力などの構造性能が低下することも想定される。

しかしながら、はく落現象のメカニズムに関する研究は現状では少ないのが実状である。このため、はく落現象を簡易な方法で事前に予測し、適切な補修時期や工法などを意思決定するための技術の確立が求められている。そこで、開削工法で構築された地下鉄駅部軌道階の上床版を想定し、鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのはく落現象を実験により模擬し、その結果から主にはく落現象の簡易予測手法の検討に関する研究の概要を示した。

図-12、13に実験の概要図を示すとともに、写真-2に実験における各状態の外観変化の状況を示す。

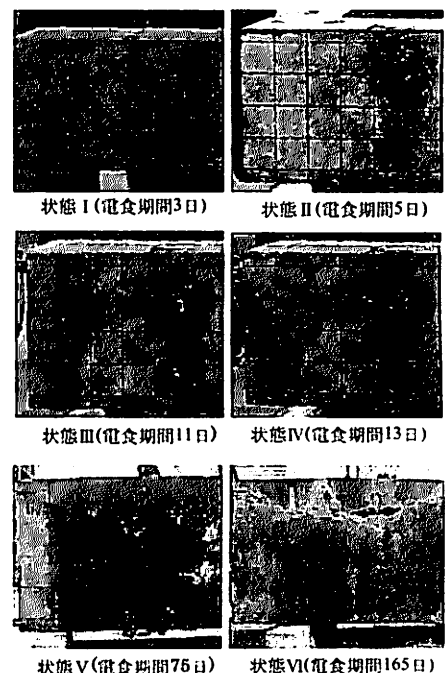


写真-2 外観変化（劣化）状況¹²⁾

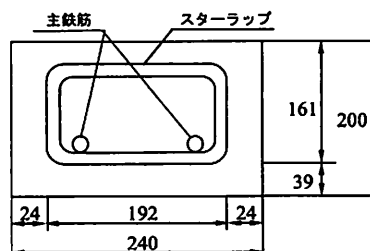
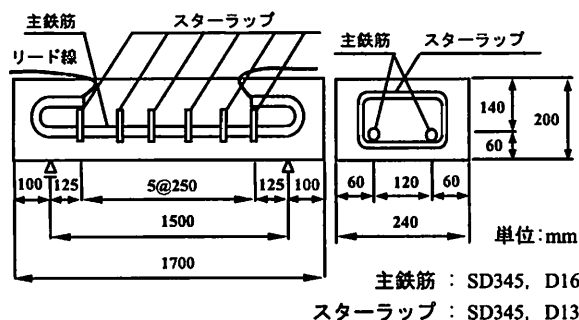
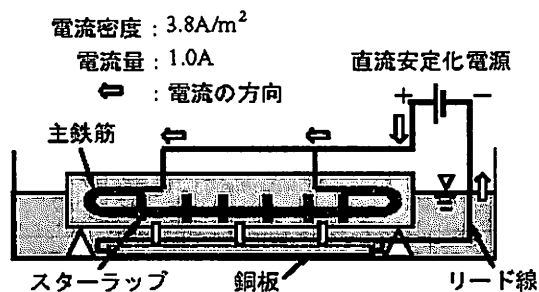
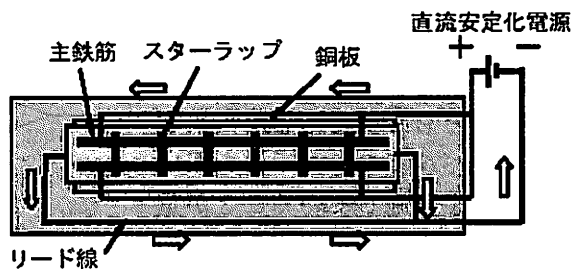


図-12 供試体の概要¹²⁾



電食実験の概要(側面)



電食実験の概要(平面)

図-13 電食実験の概要¹²⁾

実験の結果から、表-8 に示す梁部材や床版部材の目視点検評価基準を用いれば、一定の腐食速度環境下では図-14 に示される劣化進行となることが確認されている。その一方で、図-15 に示すように、はく落現象が生じなくても限界構造性能を上回る鉄筋腐食の進行がある可能性を示唆している。

表-8 コンクリート片のはく落現象を最終段階としたひび割れ外観の目視評価規準
【版構造の目視評価基準】

グレード	外観の状態
状態Ⅰ	底面に鉄筋(最もかぶりの小さい鉄筋、一般にスターラップ)に沿ったひび割れと腐食痕が見られる
状態Ⅱ	底面に鉄筋に沿ったひび割れが複数本確認でき、腐食痕が拡大している
状態Ⅲ	底面に鉄筋に沿ったひび割れが進展しそれと交わる方向の鉄筋に沿うひび割れと腐食痕が見られる
状態Ⅳ	底面に鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながる
状態Ⅴ	底面に鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながり、閉じている

【梁構造の目視評価基準】

グレード	外観の状態
状態Ⅰ	鉄筋(最もかぶりの小さい鉄筋、一般にスターラップ)に沿ったひび割れと腐食痕が見られる
状態Ⅱ	鉄筋に沿ったひび割れが複数本確認でき、腐食痕が拡大している
状態Ⅲ	鉄筋に沿ったひび割れが進展しそれと交わる方向の鉄筋に沿うひび割れと腐食痕が見られる
状態Ⅳ	鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながる
状態Ⅴ	鉄筋に沿ったひび割れとそれに交わる方向のひび割れがつながり、閉じている

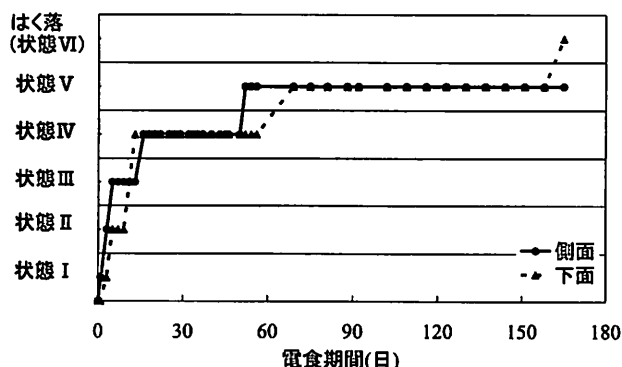


図-14 外観グレードの変化¹²⁾

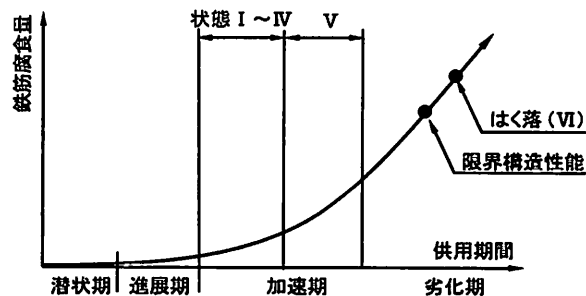


図-15 実験から想定されるはく落現象と限界構造性能の関係¹²⁾

6. まとめ

山岳トンネルの維持管理においては、各機関においてアセットマネジメントに基づく合理的な劣化予測手法の研究が始まった段階である。図-16 に長寿命化に配慮したトンネルの計画・設計・施工・維持管理の流れを示すが、これまでの対症療法的な維持管理から、今後は、劣化予測を用いた長寿命化のシナリオの確立と戦略的な維持管理計画を実施することが重要となる。今回の研究で、現状の劣化予測手法により、一応の劣化予測が可能であることが分かった。今後は、山岳トンネルの主たる構造物である覆工コンクリートの劣化予測に関して、予測手法の良否を議論することも必要であるが、まずは、現状レベルでの予測手法を用いて劣化予測を実施していくことが重要であり、数年後に判明する実際の点検結果と予測結果を検証することにより、予測手法の妥当性の確認や修正を行っていくことが必要であると考えられる。最後に、今回報告した劣化予測等に関する評価に関しては、(社)土木学会、地下空間研究委員会維持管理小委員会の成果であり、さらに研究を進めることで、トンネル構造物の保全技術の向上に貢献できるよう努める所存である。

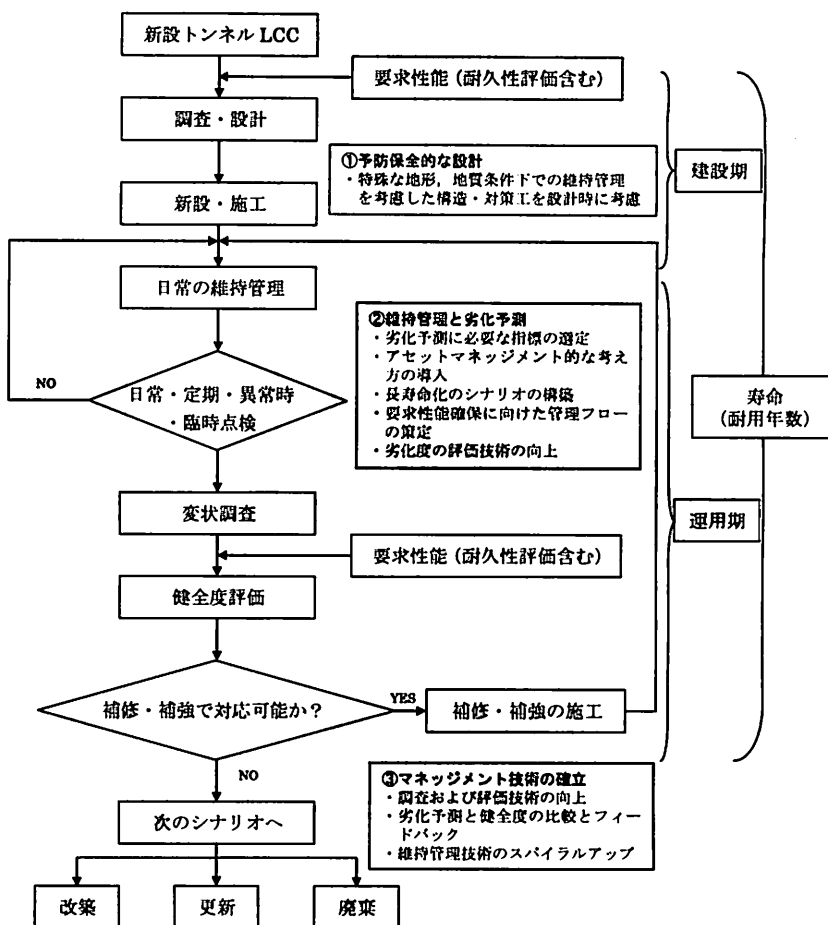


図-16 トンネルの計画・設計・施工・維持管理の流れ¹³⁾

参考文献

- (財) 道路保全技術センター, 道路トンネル点検・補修の手引き, 近畿地方整備局版, p.3, 2001.
- 国土交通省道路局: 道路統計年報2006, p17, p292, 平成18年8月.
- (社) 土木学会 岩盤力学委員会, トンネルの変状メカニズム, p20, p153, p187, 2003.
- 岡田, 藤原, 山田: 山岳トンネルの要求性能と照査項目に関する一考察, 第10回地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.10, pp.213-220, 2005.
- 松長, 朝倉, 小島, 熊坂: 地山の時間依存性を考慮した変状対策工の解析手法に関する検討, 第32回岩盤力学シンポジウム講演論文集, Vol.32, pp.41-48, 2003.
- 山田, 駒村, 山本, 田中: 山岳トンネルにおける健全度評価と劣化予測に関する一考察, 第12回地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.12, pp.63-72, 2007.
- 山田, 岡嶋, 重清: 山岳トンネルの劣化予測曲線の評価に関する一考察, 第63回土木学会年次講演会, 2008.
- 安田, 大津, 大西, アセットエンジニアリング, 土と基礎 講座「リスク工学と地盤工学」, pp35-42, 2004.
- 安田, 境, 大津, 大西, ポアソン過程によるトンネル構造物の健全度低下モデルの研究, 建設技術シンポジウム pp259-266, 2004.
- 安田亨, トンネル構造物の維持管理補修最適化に関する研究, 京都大学学位論文, 2004.3.
- 山田, 駒村, 山本, 田中: 山岳トンネルにおける健全度評価と劣化予測に関する一考察, 第13回地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.13, pp.63-72, 2008.
- 小田和伸, 乾川尚隆, 木村定雄: 鉄筋腐食によるRC覆工におけるかぶりコンクリートのはく落現象の目視点検評価手法の検討, 土木学会トンネル工学報告集, Vol.17, pp.343-348, 2007.11.
- 山田, 木村, 岡嶋, 重清, 藤原: 山岳トンネルの劣化予測曲線の特性評価に関する一考察, 第13回地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.13, p.250, 2008.

(2008. 7. 7受付)